



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104316552 B

(45)授权公告日 2017.01.25

(21)申请号 201410578904.2

审查员 李佩

(22)申请日 2014.10.24

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104316552 A

(43)申请公布日 2015.01.28

(73)专利权人 西安电子科技大学

地址 710071 陕西省西安市太白南路2号

(72)发明人 张金凤 聂玉虎 闫冉 张进成

郝跃

(74)专利代理机构 陕西电子工业专利中心

61205

代理人 王品华 朱卫星

(51)Int.Cl.

G01N 23/207(2006.01)

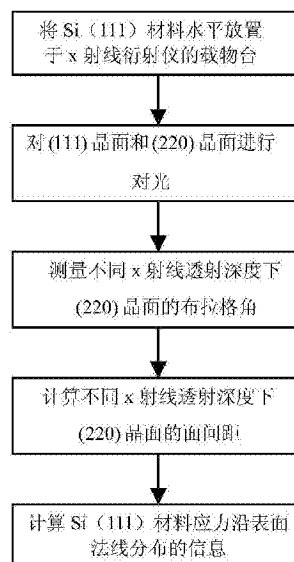
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54)发明名称

Si(111)材料应力沿表面法线分布的信息的测量方法

(57)摘要

本发明公开了一种Si(111)材料中应力沿表面法线分布信息的测量方法,主要解决现有技术不能用x射线衍射仪获取应力沿表面法线分布信息的问题。其技术步骤是:将Si(111)材料水平放置于x射线衍射仪载物台;依次对该Si(111)材料中的(111)和(220)晶面进行对光;以不小于50nm的步长减小x射线透射深度,并在各透射深度下获取(220)晶面的布拉格角;将测得的一组布拉格角代入布拉格方程,得到一组(220)晶面的面间距;根据一组面间距计算Si(111)材料应力沿表面法线分布的信息。本发明测试成本低,对被测材料无损伤,能获取一组应力沿表面法线的分布信息。



1.一种Si(111)材料应力沿表面法线分布信息的测量方法,采用x射线衍射仪进行测试,该衍射仪设有载物台,该载物台设有三个转动轴,分别为 $\omega$ 轴、x轴和 $\phi$ 轴,其中, $\omega$ 轴平行于载物台,且垂直于x射线入射光束与x射线探测器组成的平面,x轴平行于载物台,且与 $\omega$ 轴垂直, $\phi$ 轴垂直于载物台;探测器可绕与 $\omega$ 轴重合的 $2\theta$ 轴旋转,其特征在于,测试步骤包括如下:

(1)将Si(111)材料水平放置于x射线衍射仪的载物台,依次对Si(111)材料中的(111)晶面和(220)晶面进行对光:

(1a)将x射线衍射仪工作模式调为双轴晶衍射模式;

(1b)对(111)晶面做 $\omega$ 扫描,得到该晶面的摇摆曲线,然后将载物台 $\omega$ 角旋转至该曲线的衍射峰中心位置,其中, $\omega$ 角表示载物台绕 $\omega$ 轴相对于载物台初始位置旋转过的角度;

(1c)对(111)晶面做探测器扫描,得到探测器扫描曲线,然后将探测器 $2\theta$ 角旋转至该曲线的衍射峰中心位置,其中, $2\theta$ 角表示探测器绕 $2\theta$ 轴相对于探测器初始位置旋转过的角度;

(1d)重复步骤(1b),再对该(111)晶面做一次x扫描,得到x扫描曲线,并将载物台x角旋转至x扫描曲线最高点所在位置,其中,x角表示载物台绕x轴相对于载物台初始位置旋转过的角度;

(1e)重复步骤(1b)-(1c),直到摇摆曲线的峰值不再增大,得到(111)晶面双轴晶最佳对光条件,推出 $\omega$ 、 $2\theta$ 和x轴的零点校正角;

(1f)将载物台的x角调为x轴零点校正角加 $35.2643^\circ$ ,将载物台的 $\omega$ 角调为 $\omega$ 轴零点校正角加 $23.652^\circ$ ,将探测器 $2\theta$ 角调为 $2\theta$ 轴零点校正角加 $47.304^\circ$ ,便于(220)晶面衍射出光;

(1g)对(220)晶面做 $\phi$ 扫描,即固定x射线源和x射线探测器,让载物台以 $\phi$ 轴为轴心旋转,得到该晶面的 $\phi$ 扫描曲线,然后将载物台旋转至该曲线的衍射峰中心位置;

(1h)对(220)晶面做 $\omega$ 扫描,得到该晶面的摇摆曲线,然后将载物台 $\omega$ 角旋转至该曲线的衍射峰中心位置;

(1i)对(220)晶面做探测器扫描,得到探测器扫描曲线,然后将探测器 $2\theta$ 角旋转至该曲线的衍射峰中心位置;

(1l)重复步骤(1h)和(1g),再按顺序重复步骤(1h)、(1i)、(1h)和(1g),直到摇摆曲线的峰值不再增大;

(1m)将x射线衍射仪工作模式调为三轴晶衍射模式;

(1n)重复步骤(1i),得到(220)晶面三轴晶最佳对光条件;

(2)同时旋转载物台的 $\omega$ 轴、x轴和 $\phi$ 轴,使该Si(111)材料以(220)晶面法线为轴单方向旋转,并以不小于50nm的步长逐渐减小x射线透射深度,每改变一次透射深度就对(220)晶面进行一次三轴晶 $2\theta-\omega$ 扫描,获取与该透射深度所对应的(220)晶面的布拉格角 $\theta$ ;在所有x射线透射深度下都进行扫描后,最后得到一组(220)晶面的布拉格角 $\theta_i$ , $i=1,2,\dots,N$ , $N$ 表示x射线不同透射深度的个数;

(3)将测得的一组布拉格角 $\theta_i$ 代入以下布拉格方程,得到一组(220)晶面的面间距 $d_i$ :

$$d_i = \frac{n\lambda}{2\sin\theta_i}, \quad i=1,2,\dots,N$$

其中, $\lambda$ 为x射线的波长, $n$ 为衍射级数;

(4)将计算得到的一组面间距 $d_i$ 代入以下方程组,得到Si(111)材料沿表面法线分布的

(111)面内应力分量 $\varepsilon_i^{\parallel}$ 和[111]轴方向应力分量 $\varepsilon_i^{\perp}$ :

$$\varepsilon_i^{\parallel} = \frac{\frac{d_i - d_r}{d_r} (h^2 + k^2 + l^2)}{(h^2 + k^2) - \frac{2\nu_{Si}}{1 - \nu_{Si}} l^2}, \quad i=1,2,\dots,N$$

$$\varepsilon_i^{\perp} = -\frac{2\nu_{Si}}{1 - \nu_{Si}} \varepsilon_i^{\parallel}$$

其中, $d_r$ 为所参考的(220)晶面的面间距, $h,k,l$ 为(220)晶面的米勒指数, $\nu_{Si}$ 为Si(111)材料的泊松比,取值为0.278。

2.根据权利要求1所述的方法,其中步骤(2)所述的三轴晶 $2\theta-\omega$ 扫描,其操作是:在三轴晶衍射模式下,固定x射线源,使载物台绕 $\omega$ 轴旋转的同时x射线探测器以两倍于载物台的旋转速度绕 $2\theta$ 轴旋转,得到 $2\theta-\omega$ 曲线。

## Si(111)材料应力沿表面法线分布的信息的测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于微电子技术领域,涉及半导体材料的测量方法,特别是一种Si(111)材料应力沿表面法线分布信息的测量方法,可用于对Si(111)材料应力的分析。

### 技术背景

[0002] Si材料具有储量丰富、价格低廉且易于生长大尺寸高纯度单晶体等优点。目前,Si材料在半导体行业以及电子信息产业依然处于核心地位,90%以上的半导体器件和几乎所有的集成电路都是基于Si(100)、Si(110)和Si(111)材料制作的。尽管Si基集成电路工艺的水平已非常高,在Si衬底和外延材料中采用多种元素进行n型或p型掺杂改变材料的电阻率,并以局部或全局的热扩散或离子注入等工艺引入杂质时,会引起Si材料的应力沿深度方向的变化,对其器件和电路性能和可靠性会造成一定的影响。为了辅助分析和测量Si工艺引入的应力对电路性能的影响,获取应力在Si材料中的分布信息十分必要。

[0003] 目前,可对Si(111)材料的应力进行测量的设备有拉曼散射仪、卢瑟福背散射仪和高分辨率x射线衍射仪。

[0004] 拉曼散射仪是一种可对Si(111)材料应力沿表面法线分布的信息进行测量的设备,参见Stoica T,Meijers R,Calarco R,et al.analysis of depth-dependent strain of Si(111)with Raman Scattering[J].Journal of crystal growth,2006,290(1):241-247。这种方法虽然可以直接获取Si(111)材料应力沿表面法线的分布信息,但测量前首先需要对被测材料进行切片,这对被测材料造成的损伤是不可逆转的。

[0005] 卢瑟福背散射仪可以对Si(111)材料应力沿表面法线分布的信息进行无损测量,参见Luo S,Zhou W,Zhang Z,et al.analysis of depth-dependent strain of Si(111)with Rutherford Back-scattering[J].Small,2005,1(10):1004-1009。这种方法虽然对被测材料造成的损伤非常小,但是由于设备价格高昂,使用不广泛,因此该测量不具有广泛应用价值。

[0006] 高分辨率x射线衍射仪是一种对被测材料无损伤且低成本的材料测试设备。目前,采用该设备对Si(111)材料应力进行测量的步骤为:(1)对与材料表面平行的晶面如(111)晶面做三轴晶 $2\theta-\omega$ 扫描,获取该晶面的面间距,进而计算出沿表面法线即[111]轴方向的应力分量 $\epsilon^{\perp}$ ;(2)对与(111)面有一定夹角的晶面如(422)晶面做掠入射三轴晶 $2\theta-\omega$ 扫描,获取该晶面的面间距,结合(1)计算出的 $\epsilon^{\perp}$ 算出(111)晶面的面内应力分量 $\epsilon^{\parallel}$ 。参见许振嘉《半导体的检测与分析(第二版)》。然而,无论是对称 $2\theta-\omega$ 扫描还是掠入射 $2\theta-\omega$ 扫描,x射线的透射深度都是固定的,因此这种方法给出的沿[111]轴的应力分量 $\epsilon^{\perp}$ 和(111)面内应力分量 $\epsilon^{\parallel}$ 仅能近似反映被测材料在一个固定的x射线透射深度下所受应力的大小,无法给出应力沿表面法线的分布信息。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的在于提供一种Si(111)材料应力沿表面法线分布的信息的测量方

法,以解决现有技术不能用x射线衍射仪获取应力沿表面法线分布的信息这一问题。

[0008] 实现本发明的关键技术是:在Si(111)材料的晶面组中选择具有较高出光强度、且晶面倾角略大于其Bragg角的晶面,通过使用三轴晶衍射对该晶面在不同x射线透射深度下做 $2\theta-\omega$ 扫描,获取应力沿表面法线分布的信息。其技术步骤如下:

[0009] (1)将Si(111)材料水平放置于x射线衍射仪的载物台,依次对Si(111)材料中的(111)晶面和(220)晶面进行对光;

[0010] (2)同时旋转载物台的 $\omega$ 轴、x轴和 $\phi$ 轴,使该Si(111)材料以(220)晶面法线为轴单方向旋转,并以不小于50nm的步长逐渐减小x射线透射深度,每改变一次透射深度就对(220)晶面进行一次三轴晶 $2\theta-\omega$ 扫描,获取与该透射深度所对应的(220)晶面的布拉格角 $\theta$ 。在所有x射线透射深度下都进行扫描后,最后得到一组(220)晶面的布拉格角 $\theta_i, i=1, 2, \dots, N, N$ 表示x射线不同透射深度的个数;

[0011] (3)将测得的一组布拉格角 $\theta_i$ 代入以下布拉格方程,得到一组(220)晶面的面间距 $d_i$ :

$$[0012] \quad d_i = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta_i}, \quad i=1, 2, \dots, N$$

[0013] 其中, $\lambda$ 为x射线的波长, $n$ 为衍射级数;

[0014] (4)将计算得到的一组面间距 $d_i$ 代入以下方程组,得到Si(111)材料沿表面法线分布的(111)面内应力分量 $\varepsilon_i^{\parallel}$ 和[111]轴方向应力分量 $\varepsilon_i^{\perp}$ :

$$[0015] \quad \varepsilon_i^{\parallel} = \frac{\frac{d_i - d_r}{d_r} (h^2 + k^2 + l^2)}{(h^2 + k^2) - \frac{2\nu_{Si}}{1 - \nu_{Si}} l^2}, \quad i=1, 2, \dots, N$$

$$[0016] \quad \varepsilon_i^{\perp} = -\frac{2\nu_{Si}}{1 - \nu_{Si}} \varepsilon_i^{\parallel}$$

[0017] 其中, $d_r$ 为所参考的(220)晶面的面间距, $h, k, l$ 为(220)晶面的米勒指数, $\nu_{Si}$ 为Si(111)材料的泊松比,取值为0.278。

[0018] 本发明与现有技术相比具有如下优点:

[0019] 1.本发明将x射线透射深度可变的衍射技术与三轴晶 $2\theta-\omega$ 扫描相结合,可以获取不同的x射线透射深度下Si材料沿表面法线分布的精细应力信息;

[0020] 2.本发明由于能够给出一组沿表面法线分布的[111]轴应力分量和(111)面内应力分量,因此为精确分析应力影响Si集成电路性能的机理提供了依据。

## 附图说明

[0021] 图1为本发明测量Si(111)材料应力沿表面法线分布信息的流程图;

[0022] 图2为本发明中Si(111)材料(220)晶面的x射线透射深度随 $\phi$ 轴旋转角变化曲线图。

## 具体实施方式

[0023] 参照图1,本发明根据所参考的不同应力状态下(220)晶面的面间距,给出如下两

种实施例。

[0024] 实施例1,以无应力状态下(220)晶面的面间距为参考,对Si(111)材料沿表面法线分布的(111)面内应力分量 $\varepsilon_i^{\parallel}$ 和[111]轴方向应力分量 $\varepsilon_i^{\perp}$ 进行测量。

[0025] 步骤1,选用测量设备。

[0026] 本实例选用但不限于配有Ge(220)四晶单色器和三轴晶的Bruker D8Discover系统的x射线衍射仪。该x射线衍射仪设有一个x射线源、一个x射线探测器、一个真空泵和一个载物台。

[0027] 所述载物台设有三个转动轴,分别为 $\omega$ 轴、x轴和 $\phi$ 轴,其中, $\omega$ 轴平行于载物台,且垂直于x射线入射光束与x射线探测器组成的平面,x轴平行于载物台,且与 $\omega$ 轴垂直, $\phi$ 轴垂直于载物台,探测器可绕与 $\omega$ 轴重合的 $2\theta$ 轴旋转。

[0028] 步骤2,放置被测材料。

[0029] 将Si(111)材料水平放置于该x射线衍射仪的载物台中央,然后开启真空泵,使该Si(111)材料吸附于载物台上。

[0030] 步骤3,对所述Si(111)材料中的(111)晶面进行对光。

[0031] (3a)将x射线衍射仪工作模式调为双轴晶衍射模式;

[0032] (3b)对(111)晶面做 $\omega$ 扫描,即固定x射线源和x射线探测器,让载物台以 $\omega$ 轴为轴心做角度摆动,得到该晶面的摇摆曲线,然后将载物台 $\omega$ 角旋转至该曲线的衍射峰中心位置;

[0033] (3c)对(111)晶面做探测器扫描,即固定x射线源和载物台,让x射线探测器以 $2\theta$ 轴为轴心做角度摆动,得到探测器扫描曲线,然后将探测器 $2\theta$ 角旋转至该曲线的衍射峰中心位置;

[0034] (3d)重复步骤(3b),再对该(111)晶面做一次x扫描,即固定x射线源和x射线探测器,让载物台以x轴为轴心做角度摆动,得到x扫描曲线,并将载物台x角旋转至x扫描曲线最高点所在位置;

[0035] (3e)重复步骤(3b)-(3c),直到摇摆曲线的峰值不再增大,得到(111)晶面双轴晶最佳对光条件,推出 $\omega$ 、 $2\theta$ 和x轴的零点校正角。

[0036] 步骤4,对Si(111)材料中的(220)晶面进行对光。

[0037] (4a)将载物台的x角调为x轴零点校正角加 $35.2643^\circ$ ,将载物台的 $\omega$ 角调为 $\omega$ 轴零点校正角加 $23.652^\circ$ ,将探测器 $2\theta$ 角调为 $2\theta$ 轴零点校正角加 $47.304^\circ$ ,便于(220)晶面衍射出光;

[0038] (4b)对(220)晶面做 $\phi$ 扫描,即固定x射线源和x射线探测器,让载物台以 $\phi$ 轴为轴心旋转,得到该晶面的 $\phi$ 扫描曲线,然后将载物台旋转至该曲线的衍射峰中心位置;

[0039] (4c)对(220)晶面做 $\omega$ 扫描,得到该晶面的摇摆曲线,然后将载物台 $\omega$ 角旋转至该曲线的衍射峰中心位置;

[0040] (4d)对(220)晶面做探测器扫描,得到探测器扫描曲线,然后将探测器 $2\theta$ 角旋转至该曲线的衍射峰中心位置;

[0041] (4e)重复步骤(4c)和(4b),再按顺序重复步骤(4c)、(4d)、(4c)和(4b),直到摇摆曲线的峰值不再增大;

[0042] (4f)将x射线衍射仪工作模式调为三轴晶衍射模式;

[0043] (4g)重复步骤(4d),得到(220)晶面三轴晶最佳对光条件。

[0044] 步骤5,获取不同x射线透射深度下(220)晶面的布拉格角。

[0045] 参照图2,x射线透射深度与 $\phi$ 轴旋转角具有一一对应的关系, $\phi$ 轴每旋转一个角度,通过配合旋转x轴和 $\omega$ 轴,使(220)晶面位置保持不变,可以实现相应的x射线透射深度。

[0046] 测试时,以100nm为步长逐渐减小x射线透射深度,且每改变一次透射深度就对(220)晶面进行一次三轴晶 $2\theta-\omega$ 扫描,即固定x射线源,使载物台绕 $\omega$ 轴旋转,同时x射线探测器以两倍于载物台的旋转速度绕 $2\theta$ 轴旋转,得到 $2\theta-\omega$ 曲线,其峰值位置即为该透射深度所对应的(220)晶面的布拉格角 $\theta$ 。在所有x射线透射深度下都进行扫描后,最后得到一组(220)晶面的布拉格角 $\theta_i, i=1,2,\dots,N,N$ 表示x射线不同透射深度的个数。

[0047] 步骤6,计算不同x射线透射深度下(220)晶面的面间距。

[0048] 将测得的一组布拉格角 $\theta_i$ 代入以下布拉格方程,得到一组(220)晶面的面间距 $d_i$ :

$$[0049] \quad d_i = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta_i}, \quad i=1,2,\dots,N$$

[0050] 其中, $\lambda$ 为x射线源所发射的x射线的波长, $n$ 为衍射级数。

[0051] 步骤7,计算Si(111)材料应力沿表面法线分布的信息。

[0052] 将计算得到的一组面间距 $d_i$ 代入以下方程组,得到Si(111)材料沿表面法线分布的(111)面内应力分量 $\varepsilon_i^{\parallel}$ 和[111]轴方向应力分量 $\varepsilon_i^{\perp}$ :

$$[0053] \quad \varepsilon_i^{\parallel} = \frac{\frac{d_i - d_0}{d_0} (h^2 + k^2 + l^2)}{(h^2 + k^2) - \frac{2\nu_{\text{Si}}}{1 - \nu_{\text{Si}}} l^2}, \quad i=1,2,\dots,N$$

$$[0054] \quad \varepsilon_i^{\perp} = -\frac{2\nu_{\text{Si}}}{1 - \nu_{\text{Si}}} \varepsilon_i^{\parallel},$$

[0055] 其中, $d_0=0.151\text{nm}$ 为无应力状态下(220)晶面的面间距, $h=2,k=2,l=0$ 为(220)晶面的米勒指数, $\nu_{\text{Si}}$ 为Si(111)材料的泊松比,取值为0.278。

[0056] 实施例2,以斜对称衍射下得到的(220)晶面的面间距为参考,对Si(111)材料沿表面法线分布的(111)面内应力分量 $\varepsilon_i^{\parallel}$ 和[111]轴方向应力分量 $\varepsilon_i^{\perp}$ 进行测量。

[0057] 步骤A,选用测量设备。

[0058] 本步骤与实施例1的步骤1相同。

[0059] 步骤B,放置被测材料。

[0060] 本步骤与实施例1的步骤2相同。

[0061] 步骤C,对Si(111)材料中的(111)晶面进行对光。

[0062] 本步骤的具体实现与实施例1的步骤3相同。

[0063] 步骤D,对Si(111)材料中的(220)晶面进行对光。

[0064] 本步骤的具体实现与实施例1的步骤4相同。

[0065] 步骤E,获取不同x射线透射深度下(220)晶面的布拉格角。

[0066] 参照图2给出的x射线透射深度随 $\phi$ 轴旋转角变化曲线图,以200nm为步长逐渐减小x射线透射深度,且每改变一次透射深度就对(220)晶面进行一次三轴晶 $2\theta-\omega$ 扫描,得到

$2\theta-\omega$  曲线,其峰值位置即为该透射深度所对应的(220)晶面的布拉格角 $\theta$ 。在各个x射线透射深度下都进行扫描后,最后得到一组(220)晶面的布拉格角 $\theta_i, i=1,2,\dots,N,N$ 表示x射线不同透射深度的个数。

[0067] 步骤F,计算不同x射线透射深度下(220)晶面的面间距。

[0068] 将测得的一组布拉格角 $\theta_i$ 代入以下布拉格方程,得到一组(220)晶面的面间距 $d_i$ :

$$[0069] \quad d_i = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta_i}, \quad i=1,2,\dots,N$$

[0070] 其中, $\lambda$ 为x射线源所发射的x射线的波长, $n$ 为衍射级数。

[0071] 步骤G,计算Si(111)材料应力沿表面法线分布的信息。

[0072] 将计算得到的一组面间距 $d_i$ 代入以下方程组,得到Si(111)材料沿表面法线分布的(111)面内应力分量 $\varepsilon_i^{//}$ 和[111]轴应力分量 $\varepsilon_i^{\perp}$ :

$$[0073] \quad \varepsilon_i^{//} = \frac{\frac{d_i - d_0'}{d_0'}(h^2 + k^2 + l_2)}{(h^2 + k^2) - \frac{2\nu_{Si}}{1 - \nu_{Si}} l^2}, \quad i=1,2,\dots,N$$

$$[0074] \quad \varepsilon_i^{\perp} = -\frac{2\nu_{Si}}{1 - \nu_{Si}} \varepsilon_i^{//},$$

[0075] 其中, $d_0'$ 为斜对称衍射下得到的(220)晶面的面间距, $h=2, k=2, l=0$ 为(220)晶面的米勒指数, $\nu_{Si}$ 为Si(111)材料的泊松比,取值为0.278。

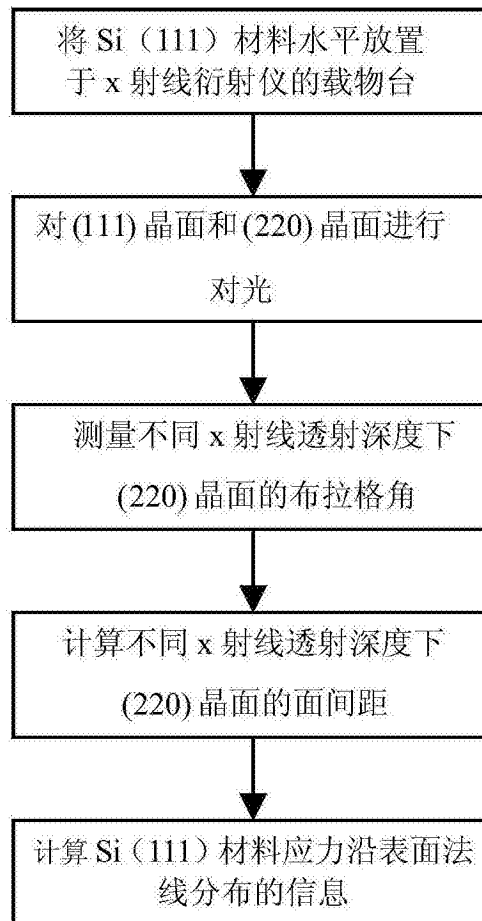


图1

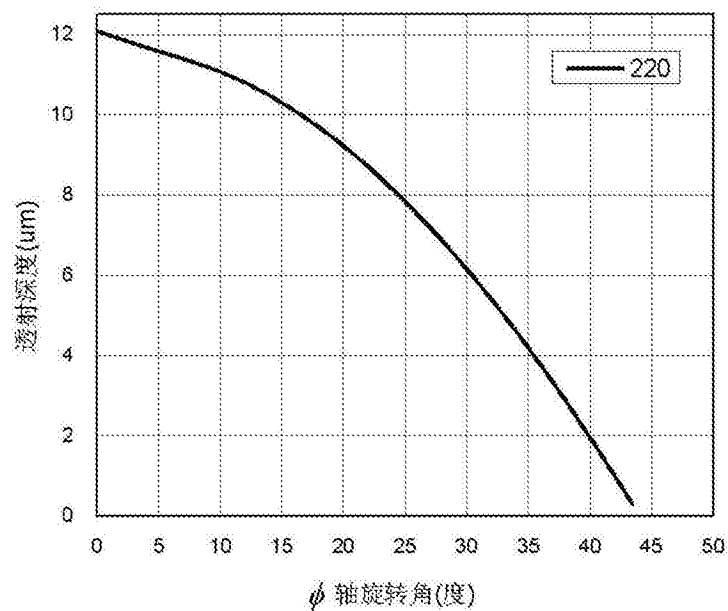


图2